



## Sammenfatning af EFP07 – Metoder til kortlægning af vindforhold i komplekst terræn

**Bechmann, Andreas; Berg, Jacob; Courtney, Michael; Ejning Jørgensen, Hans; Mann, Jakob; Sørensen, Niels N.**

*Publication date:*  
2010

*Document Version*  
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Bechmann, A., Berg, J., Courtney, M., Ejning Jørgensen, H., Mann, J., & Sørensen, N. N. (2010). *Sammenfatning af EFP07 – Metoder til kortlægning af vindforhold i komplekst terræn*. Danmarks Tekniske Universitet, Risø Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Denmark. Forskningscenter Risø. Risø-R No. 1746(DA)

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Sammenfatning af EFP07 – Metoder til kortlægning af vindforhold i komplekst terræn

## Risø-R-Report

Edited by Andreas Bechmann  
Risø-R-1746(DA)  
September 2010



**Forfatter:** Andreas Bechmann, Jacob Berg, Michael S. Courtney,  
Hans E. Jørgensen, Jakob Mann and Niels N. Sørensen  
**Titel:** Sammenfatning af EFP07 – Metoder til kortlægning af  
vindforhold i komplekst terræn  
**Afdeling:** Vindenergi

**Abstract (in English)**

This report describes the work done in the project "EFP07-  
Metoder til kortlægning af vindforhold i komplekst terræn"  
granted by the Danish Energy Agency. References to reports  
published during the project are given.

The main purpose of the project has been to investigate  
micro-scale wind conditions in complex terrain using  
"remote-sensing" techniques and CFD computations and  
validate these using measurements.

The work done in the project can be divided into three parts:

1. "The Bolund Experiment" is a measuring campaign  
performed on a small hill located near Risø DTU.  
The experiment provides data for validating CFD  
models.
2. "The blind comparison" is a comparison of more than  
50 different micro-scale models and the Bolund  
measurements.
3. "The Benakanahalli Experiment" is a large-scale  
measuring campaign that provides a complex  
validation case for micro-scale models.

**Risø-R-1746(DA)**  
**September 2010**

**ISSN 0106-2840**  
**ISBN 978-87-550-3842-4**

**Kontrakt nr.:**  
ENS-33033-0062

**Gruppens reg. nr.:**  
1110058-01

**Sponsorship:**  
Energistyrelsen,  
Danish Energy Agency,  
Vestas Technology R&D

**Forside :**  
Billede af Bolund

**Sider: 8**  
**Tabeller:**  
**Referencer:6**

Afdelingen for Informationsservice  
Risø Nationallaboratoriet for  
Bæredygtig Energi  
Danmarks Tekniske Universitet  
Postboks 49  
4000 Roskilde  
Danmark  
Telefon 46774005  
[bibl@risoe.dtu.dk](mailto:bibl@risoe.dtu.dk)  
Fax 46774013  
[www.risoe.dtu.dk](http://www.risoe.dtu.dk)

# Indhold

## **1 Indledning 4**

### **1.1 Offentligt tilgængelige dokumenter 4**

## **2 Bolund Eksperimentet 5**

## **3 Blindtest 6**

## **4 Benakanahalli Eksperimentet 7**

# 1 Indledning

Den 13. februar 2007 gav Energistyrelsen tilsagn om at støtte projektet med titlen: ”EFP07- Metoder til kortlægning af vindforhold i komplekst terræn” under Energi forskningsprogrammet (Journalnr.: 033001/33033-0062) med projekt deltagerne Risø DTU og Vestas Technology R&D. Denne rapport er en del af slutrapporteringen og indeholder en sammenfatning af resultaterne opnået under projektet, der strækker sig fra den 1. april 2007 til den 30. juni 2010. I den oprindelige projektformulering er formålet med projektet beskrevet således:

*”Formålet med projektet er at udvikle metoder til kortlægning af site-specifikke vindforhold i komplekst terræn på baggrund af målekampagner ved anvendelse af ”remote-sensing” teknikker i kombination med anvendelsen af avancerede strømningsløpere”.*

Baggrunden for projektet er, at mange vindmølleparker i dag opstilles i komplekst terræn, hvor de opserverede vindforhold kan afvige fra vindforudsigelserne beregnet af mange strømningsmodeller. Der er dermed risiko for at møllerne bliver placeret på positioner, hvor vindbelastningen overstiger designgrundlaget. For at fuldføre projektets målsætning om at forbedre metoderne til bestemmelse af vindforholdene, er nedenstående del-elementer blevet gennemført. Denne rapport er inddelt i tilsvarende afsnit, der beskriver hvert del-element:

1. Bolund eksperimentet. Målekampagne på Bolund bakken ved Roskilde fjord
2. Blindtest af strømningsmodeller og verifikation med Bolund målingerne
3. Benakanahalli målekampagne i Indien

## 1.1 Offentligt tilgængelige dokumenter

I denne rapport refereres der til følgende offentligt tilgængelige dokumenter, som er blevet udarbejdet som del af projektet:

[1] A. Bechmann.

*Presentations from “The Bolund experiment: Workshop” 3-4<sup>th</sup> December 2009.*

Technical Report Risø-R-1745(EN), Risø National Lab., Roskilde, Denmark, 2010.

[2] A. Bechmann, J. Berg, M.S. Courtney, H.E. Jørgensen, J. Mann and N.N Sørensen.

*The Bolund experiment: Overview and Background.*

Technical Report Risø-R-1658(EN), Risø National Lab., Roskilde, Denmark, 2009.

[3] A. Bechmann, J. Johansen and N.N. Sørensen.

*The Bolund experiment: Design of measurement campaign using CFD.*

Technical Report Risø-R-1623(EN), Risø National Lab., Roskilde, Denmark, 2007.

[4] J. Berg, A. Bechmann, M.S. Courtney, H.E. Jørgensen, J. Mann, P-E Réthoré and N.N Sørensen.

*The Benakanahalli experiment: Overview and Background.*

Technical Report Risø-R-1742(EN), Risø National Lab., Roskilde, Denmark, 2010.

(I skrivende stund ikke offentliggjort)

[5] J. Johansen, H.E. Jørgensen, A. Bechmann, M.S. Coutney, J. Mann, N.N Sørensen, L.C. Christensen.

*The Bolund experiment – a new dataset of local wind conditions in complex terrain.*

Presentation. EWEC, Brussels, 3. April 2008.

[6] *The Bolund Experiment*.  
Hjemmeside: <http://Bolund.risoe.dk>

## 2 Bolund Eksperimentet

Bolund er en markant morænebakke ved Roskilde Fjord og har været et centralt element i hele projektet. Fra d. 21. december 2007 til d. 25. februar 2008 blev der gennemført en storstillet målekampagne på Bolund, som er grundigt beskrevet i reference 2. Formålet var at etablere et kontrolleret vindmålingseksperiment, dels for at få data til verificering og videreudvikling af modeller til bestemmelse af vindforhold for møller og dels for at videreudvikle og anvende "remote-sensing" målemetoden lidar. Bolund blev valgt fordi den har mange egenskaber, der er relevante for et komplekst terræn eksperiment:

- Bolunds skrænter med hældninger på over 45 grader gør den "kompleks" og dermed svær for nuværende modeller at regne rigtig på.
- Ruhedsskiftet fra vand til land er med til at øge kompleksiteten.
- Bolund er uniformt dækket med græs, hvilket gør det mere entydigt at opstille de korrekte "randbetingelser", når man vil modellere Bolund.
- Den isolerede beliggenhed betyder, at vinden, der når Bolund, har opnået en form for ligevægt, som kan specificeres entydigt, når man vil modellere Bolund.
- Der er nem adgang til Bolund fra Risø DTU, hvilket er en fordel ved etableringen af eksperimentet.

Inden eksperimentet blev påbegyndt, blev der i samarbejde med Vestas foretaget en række vind beregninger (CFD beregninger), der skulle danne grundlag for planlægningen af eksperimentet. CFD beregningerne blev bl.a. benyttet til bestemmelse af målemastefordelingen samt instrumenteringen af de enkelte målemaster (se reference 3.).

Da planlægningen af eksperimentet var færdigt, skulle der søges tilladelse til opstilling af måleudstyret på Bolund. Samtlige tilladelser fra offentlige myndigheder blev endeligt bevilget d. 3. december, hvorefter en massiv indsats på instrumentering af bakken blev iværksat. På grund af dyrelivet og den fredede natur skulle eksperimentet gennemføres inden for et lille tidsrum (December 2007 – Februar 2008), og de tunge målemaster skulle bæres ud ved håndkraft. I frost vejr og hård vind blev måleudstyret skånsomt båret ud og monteret, og måledata begyndte at løbe ind d. 21. december 2007. Vind og turbulens blev målt vha. 12 kop anemometre, 23 sonic anemometre samt tre "remote sensing" lidar. Desuden blev vandstand og temperatur målt flere steder. Målingerne fortsatte indtil 25. januar 2008, hvor målekampagnen som planlagt blev afsluttet for at målemaster og måleudstyr kunne fjernes inden udløbet af den offentlige tilladelse d. 1 marts 2008.

Bolund målekampagnen forløb upåklageligt, og har været en stor succes, idet det er lykkedes at indsamle vindmålinger synkront fra 12 kop anemometre, 23 sonic anemometre samt tre lidar med en meget høj dækningsprocent. Lidar målingerne havde en dækningsperiode på godt 80% og er blevet verificeret med målingerne fra kop anemometrerne. De indløbne data er blevet færdigbehandlet og ligger nu en omfattende database. En stor del af målingerne blev benyttet til blindtesten (se næste

afsnit) og er offentligt tilgængelige. Adgang til den fulde database vil blive mulig fra 2011 og kan ske ved at kontakte projekt deltagerne.

Sammenfattende har Bolund eksperimentet forløbet tilfredsstillende. CFD er i samarbejde med Vestas blevet benyttet til at planlægge målekampagnen, og avancerede "remote sensing" måleteknikker er succesfuldt blevet benyttet under selve målekampagnen. Måledataene fra Bolund er af international kvalitet, og vil blive brugt til at validere og udvikle numeriske værktøjer til bestemmelse af vindforholdene i komplekst terræn i mange år fremover (se afsnit om blindtest).

En artikel om Bolund eksperimentet er under udarbejdelse til et internationalt anerkendt tidsskrift:

Berg J, Bechmann A, Mann J, Jørgensen H, Réthoré P-E, Sørensen N, Courtney M  
The Bolund experiment, part I: flow over a steep, three-dimensional hill

### 3 Blindtest

Et grundlæggende mål med projektet har været at forbedre og verificere strømningsmodeller til bestemmelse af vindforholdene i komplekst terræn. Da en international workshop, hvor Bolund målingerne skulle offentliggøres også var en del af projektet, blev det besluttet at inkludere en "blindtest". I slutningen af år 2009 blev industrien, universiteter og andre interessenter fra hele verden udfordret til at forudsige vindforholdene over Bolund. Da Bolund målingerne endnu ikke var offentliggjort, og deltagerne derfor ikke kendte det "rigtige" resultat, skulle forudsigelserne foretages i "blinde". Dermed var blindtesten en enestående verifikation af strømningsmodellerne og en måde at gøre industrien opmærksom på Bolund målingerne.

Blindtesten blev en stor succes. 57 forskellige forudsigelser blev indsendt til Risø DTU inden tidsfristen udløb d. 1/11 2009, og omkring 80 deltagere deltog i en efterfølgende workshop på Risø d. 3-4/12 2009, hvor resultaterne blev offentliggjort. Det blev et par meget spændende dage med livlige diskussioner, spændene præsentationer og overraskende resultater. Sammenligningerne mellem simuleringresultaterne og målingerne kan findes i reference 1 og 6, som også indeholder de præsentationer, der blev fremlagt på workshopen.

Blindtesten har vist at Bolund målingerne er meget velegnede til at verificere strømningsmodeller til bestemmelse af vindforhold i komplekst terræn. 75% af de indsendte resultater var foretaget med avancerede CFD metoder, hvilket viser at disse metoder har gjort deres indtog i industrien. Ved første øjekast er der dog en del spredning mellem resultaterne. Ser man imidlertid bort fra de resultater, hvor der er foretaget elementære fejl, og hvor opgaven er misforstået, ligger resultaterne tæt på hinanden og på målingerne. En konklusion fra blindtesten er derfor, at det er vigtigt at CFD brugeren har en vis erfaring med den model han benytter.

En artikel om blindtesten er under udarbejdelse til et internationalt anerkendt tidsskrift:

Bechmann A, Berg J, Mann J, Réthoré P-E, Sørensen N.N.  
The Bolund Experiment, Part II: Blind Comparison of Micro-Scale Flow Models

## 4 Benakanahalli Eksperimentet

En sidste del af projektet har omhandlet benyttelsen af de udviklede metoder i et "fuldskala" komplekst terræn, som skal danne grundlag for yderligere verifikation af CFD samt af "remote sensing" måleteknikker. Ved "fuldskala" menes et terræn hvor effekter som Corioliskraft og temperatur stratificering har betydning for vinden. Disse effekter kan negligeres for Bolund. Efter nogen tids søgning lykkedes det at finde et egnet terræn ("Benakanahalli") i Indien og de i projektet udviklede CFD værktøjer blev lagt til grund for planlægningen af eksperimentet. 5 80m høje master blev instrumenteret med 24 sonic anemometre, termometre, hygrometre samt et radiometer, og et "remote sensing" ceilometer blev benyttet til at måle grænselagshøjden. Benakanahalli eksperimentet er dermed en stor målekampagne, der vil danne grundlag for udviklingen af fremtidens CFD værktøjer.

Selve eksperimentet blev påbegyndt i december 2009 og kørte fuldt instrumenteret i en 3 måneders periode fra februar til april 2010, hvorefter målemaster og måleudstyr blev fjernet. De indløbne data er blevet færdigbehandlet og ligger nu i en omfattende database, og en beskrivelse af eksperimentet kan findes i reference 4. Ønskes der adgang til målingerne, skal det ske ved aftale med projekt deltagerne.



Benakanahalli set fra bakketoppen



Risø DTU er Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi. Forskningen er rettet mod udviklingen af klimavenlige energiteknologier og energisystemer, og bidrager til innovation, uddannelse og rådgivning. Risø har store forsøgsfaciliteter og tværfaglige forskningsmiljøer og inkluderer kompetencecenteret for nukleare teknologier.

---

**Risø DTU**  
**Nationallaboratoriet for Bæredygtig Energi**  
**Danmarks Tekniske Universitet**

Frederiksborgvej 399  
Postboks 49  
4000 Roskilde  
Telefon 4677 4677  
Fax 4677 5688

[www.risoe.dtu.dk](http://www.risoe.dtu.dk)